

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

Madame Hanane YAAGOUBI

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Sciences de l'ingénieur

Le Samedi 8 Juillet 2023 à 10H30 à l'Amphi 4 à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUE DU PROCÉDÉ DE FRITTAGE SÉLECTIF PAR
LASER DU POLYAMIDE 12**

Devant le Jury composé de :

Président :

Pr. Mohammed BENNANI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse :

Pr. Mourad TAHA JANAN, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Co-Directeur de thèse :

Pr. Hamid ABOUCHADI, PH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Rapporteurs :

Pr. Abdellah EL BARKANY, PES, FST, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès

Pr. Khalid ZARBANE, PES, EST, Université Hassan II, Casablanca

Pr. Abdelouahhab SALIH, PH, ENSAM, Université Mohammed V, Rabat

Examineurs :

Pr. Abdelilah JALID, PH, ENSAM, Université Hassan II, Casablanca



Résumé: Le frittage sélectif par laser est un procédé de fabrication additive à base de poudre de polyamide 12 qui permet de fabriquer rapidement des pièces en trois dimensions avec d'excellentes propriétés mécaniques similaires aux méthodes de fabrication conventionnelles. L'optimisation du frittage sélectif par laser de polyamide 12 pour la fabrication additive nécessite une modélisation mathématique globale de ce procédé. Dans nos travaux, nous nous intéressons à la modélisation mathématique thermo-mécanique du procédé afin de contrôler l'évolution de la température en fonction du temps pour prédire certaines caractéristiques des pièces finales, telles que la cristallinité et la porosité ainsi que les contraintes et déformations d'origine thermique. Plusieurs phénomènes physiques se produisent de manière couplée lors du frittage sélectif par laser, ses couplages multi-physiques qui permettent d'intégrer l'histoire thermique du matériau et la thermo-dépendance de ses propriétés lors de la modélisation de ses transformations (fusion, coalescence, densification, cristallisation), La mécanique (loi de comportement, contraintes, déformations) et la métallurgie (composition des matériaux, structure cristallographique) sont les phénomènes dominants. En effet, cette technologie est encore relativement récente et donc peu présente dans le domaine de l'industrie. Cela est dû en partie au côté rassurant des technologies utilisées aujourd'hui, mais aussi au fait qu'il est aujourd'hui impossible de modéliser correctement les processus de fabrication additive et cela rend difficile la fabrication fiable des pièces. Ce travail s'inscrit dans une perspective de recherche visant à développer des nouvelles simulations numériques de processus de frittage sélectif par laser du polyamide 12 avec des différentes méthodes numériques tel que la méthode sans maillage (Meshless) et la méthode de différence finie en utilisant le logiciel MATLAB et aussi des simulations numériques sous le logiciel COMSOL Multiphysics , ces derniers ont pour but de comprendre la modélisation complète du procédé de frittage sélectif par laser du polyamide 12 en prendre en considération tous les phénomènes qui réagissent dans le lit de la poudre pour bien calculer la température maximale au sein du spot laser du CO₂ dans le lit de poudre de polyamide 12. A l'issue de ce travail, nous avons réussi à établir potentiellement deux codes Matlab et des simulations thermo-mécaniques numériques par le logiciel COMSOL Multiphysics V5.6 utilisables par un utilisateur avisé dans le domaine de la fabrication additive de type SLS : (i) Modélisation de calcul en régime transitoire : Cette modélisation de couche de polyamide 12 frittée par un laser CO₂, stocke tous les champs de températures successifs dans une liste, ce qui permet d'aller visualiser un champ au choix pour éventuelle analyse ultérieure. (ii) Une modélisation Thermo-mécanique du procédé de frittage sélectif par laser du PA12 par le logiciel COMSOL V5.6 en se basant sur les équations de la conservation du volume en déformation plastique en couplage avec des conditions d'équilibre et de compatibilité pour calculer les contraintes résiduelles.

Mots-clés: Fabrication additive, frittage sélectif par laser, modélisation mathématique, optimisation, polyamide 12, simulation numérique.

Abstract: Selective laser sintering is an additive manufacturing process based on polyamide 12 powder that allows the rapid manufacture of three-dimensional parts with excellent mechanical properties similar to conventional manufacturing methods. The optimization of the selective laser sintering of polyamide 12 for additive manufacturing requires global mathematical modeling of this process. In our work, we are interested in the thermo-mechanical mathematical modeling of the process in order to control the evolution of the temperature as a function of time and predict certain characteristics of the final parts, such as crystallinity and porosity, as well as stresses and deformations. of thermal origin. Several physical phenomena occur in a coupled manner during selective laser sintering, its multi-physical couplings make it possible to integrate the thermal history of the material and the thermo-dependence of its properties during the modeling of its transformations (fusion, coalescence, densification, crystallization), Mechanics (law of behavior, stresses, deformations) and metallurgy (composition of materials, crystallographic structure) are the dominant phenomena. Indeed, this technology is still relatively recent and therefore not present in the field of industry. This is partly due to the reassuring side of the technologies used today, but also to the fact that it is now impossible to model additive manufacturing processes correctly, which makes it difficult to reliably manufacture parts. This work is part of a research perspective aimed at developing new numerical simulations of the process of selective laser sintering of polyamide 12 with different numerical methods such as the meshless method (Meshless) and the finite difference method using the MATLAB software, and also numerical simulations under the COMSOL Multiphysics software V5.6. The latter aims to understand the complete modeling of the process of selective laser sintering of polyamide 12 to take into consideration all the phenomena that react in the powder bed to properly calculate the maximum temperature within the CO₂ laser spot in the polyamide 12 powder bed. At the end of this work, we succeeded in potentially establishing two Matlab codes and a numerical simulation by the COMSOL Multiphysics software that can be used by a knowledgeable user in the field of SLS-type additive manufacturing: (i) Calculation modeling in the transient state: This modeling of a layer of polyamide 12 sintered by a CO₂ laser, stores all the successive temperature fields in a list, which makes it possible to visualize a field of your choice for possible subsequent analysis. (ii) Thermo-mechanical modeling of the sintering process selected by laser of the PA12 by the software



COMSOLV5.6 using the equations of the conservation of volume in plastic deformation in coupling with equilibrium and compatibility conditions to calculate the stresses residuals.

Keywords: Additive manufacturing, mathematical modeling, numerical simulation, optimization, Polyamide 12, selective laser sintering.